

На правах рукописи



АУНГ ТХУ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ
ЛЕГКИМИ ДРОНАМИ В УСЛОВИЯХ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 05.13.01 — «Системный анализ, управление
и обработка информации (технические системы)»

МОСКВА
2022

Работа выполнена в «Институте МПСУ» Национального
исследовательского университета «МИЭТ».

Научный руководитель	- кандидат технических наук, профессор Лупин Сергей Андреевич.
Официальные оппоненты	- Увайсов Сайгид Увайсович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет", Москва
	- Миляков Денис Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела АО "Концерн "Вега", Москва
Ведущее предприятие	- Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет", Тула.

Защита диссертации состоится «20» сентября 2022 года в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.134.06 в Национальном исследовательском университете «МИЭТ» по адресу: 124498, Москва, Зеленоград, площадь Шокина, д.1, МИЭТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИЭТ и на сайте <https://miet.ru>.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2022 года.

Ученый секретарь:

доктор технических наук,
доцент



Гуреев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стремительно ворвались в нашу повседневную жизнь. Ещё совсем недавно они были неотъемлемым атрибутом фантастических произведений, а сегодня трудно найти области человеческой деятельности, в которых бы не использовались дроны.

Существует разнообразная классификация БПЛА, основанная на множестве параметров, определяющих их функциональность. Среди них можно выделить: вес, тип привода, основная функция, уровень автономности. Если для тяжелых аппаратов, в первую очередь для боевых дронов, вопросы их применения тщательно регламентируются, то для малых и сверхмалых дронов, которые были ориентированы только на игровое применение, никаких ограничений не существовало. Теперь они уже есть и связано это в первую очередь с тем, что даже малые модели можно использовать для выполнения серьезных миссий. Анализ литературы показывает широкий интерес к проблематике дронов, а тенденцию к расширению областей применения лёгких БПЛА можно считать доминирующей.

Большинство моделей лёгких дронов это довольно примитивные устройства с ограниченным запасом энергии, что порождает множество проблем при реализации ими полностью автономных миссий. Дистанционное управление требует достаточно серьезной подготовки пилотов, что является несомненным препятствием для широкого использования дронов. Для обеспечения возможности автономной работы квадрокоптеры должны иметь на борту систему навигации, позволяющую контролировать ход выполнения миссии. Навигационные решения, опирающиеся на спутниковые системы, повышают как стоимость аппаратов, так и их энергопотребление. Альтернативным вариантом может служить архитектура навигации, базирующаяся на современных микромеханических сенсорах. Малый вес, низкое энергопотребление и независимость от внешних источников информации идеально подходят для малых БПЛА.

Настоящая работа направлена на исследование возможности применения легких квадрокоптеров для выполнения различных миссий в полностью автономном режиме в условиях ветровой нагрузки.

Целью диссертационного исследования является создание модели проблемно-ориентированной системы управления легкими дронами в условиях воздействия ветровой нагрузки, направленное на расширение

спектра выполняемых ими миссий. Это соответствует областям исследований, определенных в паспорте специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации» (пункты 3, 9 и 11).

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

1. Проведён анализ основных особенностей применения беспилотных летательных аппаратов в различных областях человеческой деятельности.
2. Рассмотрены конструктивные и схемотехнические варианты и примеры реализации беспилотных летательных аппаратов для различных сфер применения.
3. Проанализированы принципы построения систем навигации беспилотных летательных аппаратов и входящие в их состав сенсоры.
4. В среде Matlab разработана модель автономного полёта легкого квадрокоптера при воздействии ветровой нагрузки.
5. Разработано приложение, ориентированное на определение параметров траектории автономного полёта легкого квадрокоптера при воздействии ветровой нагрузки.
6. Проведено моделирование, результаты которого подтвердили возможность осуществления автономного полёта квадрокоптеров при ветровой нагрузке.

Объектом исследования являются системы управления беспилотными летательными аппаратами.

Предмет исследования составляют методы и алгоритмы управления автономным полётом квадрокоптеров в условиях ветровой нагрузки.

Методы исследования. При решении поставленных задач были использованы положения теории вероятностей, методы математического моделирования и объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна проведённого исследования заключается в следующем:

1. Разработана и реализована в среде Matlab математическая модель автономного полёта квадрокоптера при воздействии ветровой нагрузки, которая позволяет анализировать затраты энергии и точность позиционирования.
2. Проведены серии модельных экспериментов, результаты которых подтвердили, что параметры траектории полёта квадрокоптера в

условиях ветровой нагрузки в автономном режиме оказывают влияние на точность его позиционирования и расход энергии.

3. Предложена структурная схема системы управления малыми дронами, способными выполнять миссии в автономном режиме в условиях ветровой нагрузки опираясь только на данные микромеханических сенсоров.
4. Доказана возможность обеспечения автономного полёта лёгких мультироторных дронов, использующих для ориентации микромеханические сенсоры, что позволяет применять их в условиях ветровой нагрузки без участия специально подготовленного оператора.

Практическая значимость. Исследования методов построения оптимальной траектории автономного полёта квадрокоптеров, проведенные в диссертации, доказали возможность практического использования подобных устройств в условиях ветровой нагрузки. Ранее считалось, что в таких условиях точность позиционирования могут обеспечивать только аппараты, оснащенные сложными спутниковыми или оптическими навигационными системами. Предложенный подход позволит расширить область применения недорогих дронов и использовать их в тех ситуациях, когда существует высокая вероятность потери аппарата. Это в первую очередь относится к действиям во время чрезвычайных ситуаций, вызванных техногенными или природными факторами.

Достоверность полученных результатов и выводов. Достоверность выдвинутых в диссертации положений и сделанных выводов опирается на корректное использование общепринятых математических методов, подтверждается результатами моделирования.

Внедрение результатов. Разработанная в диссертации математическая модель полёта мультироторных дронов в условиях ветрового воздействия используется при планировании воздушной разведки во время дорожного строительства в Технологическом Институте, г. Янгон, Мьянма. Акт внедрения представлен в приложении.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Математическая модель автономного полёта легкого квадрокоптера при воздействии ветровой нагрузки, позволяющая оценивать затраты энергии и точность позиционирования для разных вариантов траектории полёта.

2. Структурная схема системы управления малыми дронами, включающая приложение, определяющее параметры траектории автономного полёта при воздействии ветровой нагрузки.
3. Обоснование возможности использования лёгких дронов, использующих для ориентации микромеханические сенсоры, для выполнения миссий в условиях ветровой нагрузки.

Апробация работы. Результаты работы были представлены и обсуждались на следующих научных конференциях:

1. Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях», МИЭТ, 2021г.
2. 25, 26, 27, 28 и 29 Всероссийские межвузовские научно-технические конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика, МИЭТ, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022.
3. 11 Всероссийские научно-практические конференции «Актуальные проблемы информатизации в науке, образовании и экономике», МИЭТ, 2018.
4. 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus2018), MIET, Moscow, 2020.
5. 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus2021), MIET, Moscow, 2021.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 тезисов докладов и 9 статей, в том числе 3 в журналах, входящих в перечень ВАК, 4 работы проиндексированы в Scopus.

Структура и объём диссертационной работы. Рукопись диссертационной работы, общим объёмом 121 страница, состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 97 источников и четырёх приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены объект и предмет исследования, проблемная ситуация, научная проблема, решаемая в диссертации, цели и задачи исследования, научная новизна и достоверность новых научных результатов; сформулированы научные положения, выносимые на защиту; указаны теоретическая и методическая основы исследования,

определена практическая ценность и значимость работы; приведены сведения о реализации новых научных результатов работы, их апробации и публикациях.

В первой главе описаны классификация и применение беспилотных аппаратов. Области использования беспилотных летательных аппаратов охватывают широкий спектр гражданских и военных применений. Беспилотники могут выполнять как наружные, так и внутренние миссии в очень сложных условиях. Беспилотники могут быть оснащены различными датчиками и камерами для выполнения разведывательных, наблюдательных и мониторинговых миссий. Приложения беспилотников можно классифицировать по-разному. Они могут характеризоваться типом миссий – военные или гражданские, областью зон полета – снаружи помещений или внутри них и пространством, в котором осуществляется движение – земля, воздух, космос, надводные или подводные миссии.

В будущем дроны будут иметь более двухсот применений в зависимости от их типов (рис. 1).

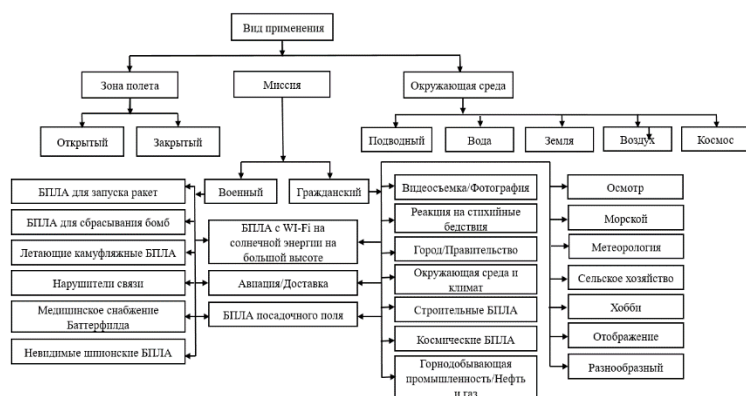


Рис. 1 Классификация областей применения БПЛА

Область применения беспилотных летательных аппаратов неуклонно расширяется. Локомотивом этого процесса является как совершенствование элементной базы электроники, так и появление дешевых сенсоров, обеспечивающих автономность дронов.

Характерной особенностью современного этапа развития БПЛА можно считать наличие устойчивого спроса на летательные аппараты во всех классах – от сверхлегких моделей, до тяжелых дронов.

В основе систем управления легкими беспилотными аппаратами, как правило, лежат достаточно мощные микроконтроллеры, обеспечивающие обработку информации от совокупности сенсоров в реальном времени. Кроме того, для решения задач навигации используют спутниковые системы в сочетании с анализаторами видеоизображений. Конечно, это расширяет функциональность устройств, но одновременно повышает их стоимость и требует высоких затрат энергии. Совершенствование методов и систем управления легкими БПЛА, ориентированное на снижение энергозатрат, является актуальной задачей.

Во второй главе рассматриваются варианты реализации БПЛА. На классификацию БПЛА оказывают влияние их различные технические характеристики. Рассмотрим более подробно эти характеристики и примеры существующих беспилотных летательных аппаратов. Наибольшее внимание уделим типом многороторным БПЛА. Этот тип систем сейчас применяется гораздо чаще других. Примерами других систем являются так называемые гибридные системы, которые представляют собой как многороторные системы, так и системы с неподвижным крылом, орнитоптеры и БПЛА, использующие турбовентиляторы. Технология, используемая для поддержания полета БПЛА, определяет его тип.

Отсутствие пилота на борту БПЛА требует от них определенного уровня автономности. Важным понятием в концепции автономии является различие между автоматическими и автономными системами. Автоматическая система может самостоятельно выполнять задание, следуя запрограммированному сценарию. Примером может служить автоматическая стабилизация дрона во время полета. В отличие от автоматических, автономные системы могут справляться с неожиданными ситуациями, используя заранее запрограммированный набор правил, который помогает им сделать выбор. Автоматические системы не могут воспользоваться этой «свободой выбора».

Министерство обороны США выделяет четыре уровня автономии в своей дорожной карте для беспилотных систем.

Базовый уровень автономности - это управляемая человеком система, в которой человек-оператор принимает все решения, касающиеся работы БПЛА. Эта система не имеет никакого автономного контроля окружающей среды.

Второй уровень автономии - это система делегирования полномочий человеком. Такая система может выполнять множество

функций, не зависящих от человеческого контроля. БПЛА может выполнять задачи, когда ему это поручено, без дополнительного участия человека. Примерами являются органы управления двигателем, автоматическое управление и другие средства автоматизации, которые должны быть активированы или деактивированы оператором.

Третий уровень автономии - это система, контролируемая человеком. Эта система может выполнять различные задачи, когда человек дает ей определенные разрешения и указания. Как сама система, так и супервизор могут инициировать определенные действия на основе данных сенсоров. Однако система может инициировать эти действия только в рамках текущей задачи.

Конечным уровнем автономии является полностью автономная система. Эта система принимает команды, вводимые человеком, и переводит их в конкретные задачи без дальнейшего взаимодействия с человеком. В случае чрезвычайной ситуации человек-оператор может вмешаться в процесс выполнения задания.

Среди множества сенсоров, обеспечивающих управление полётом, для малых БПЛА наиболее важны следующие:

Гироскопы. Традиционные гироскопы обычно были дорогими и громоздкими, но с развитием технологии производства полупроводников применение микроэлектромеханических датчиков (МЭМС) перешло к невоенным целям, что сделало МЭМС-гироскопы дешевле и меньше и, следовательно, более подходящими для ориентации в полете на борту беспилотников.

Акселерометры. Эти инерциальные датчики представляют собой электромеханические устройства, которые измеряют мгновенное линейное ускорение $\{B\}$ под действием внешних сил, статических (например, постоянной силы тяжести) или динамических (вызванных перемещением акселерометра). Наиболее распространенным косвенным способом измерения ускорения является измерение изменений электрических емкостей.

В таблице 1 приведены результаты сравнительного анализа различных типов сенсоров, при условии их единичного использования. Комбинации сенсоров разного типа позволяют устранять имеющиеся недостатки, и это характерно для современных моделей квадрокоптеров. Проведенный анализ показывает, что в качестве бортовых сенсоров для малых БПЛА можно использовать современные микромеханические сенсоры. Их энергетические и точностные характеристики, малые габариты в сочетании с микроконтроллерным

управлением позволяют обеспечивать автономный режим полёта дронов.

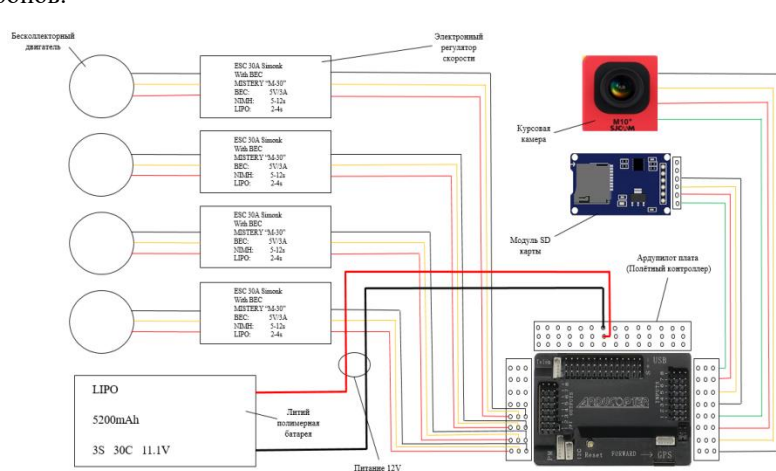


Рис. 2 Схема программируемого дрона

В третьей главе диссертации рассмотрены структура модели и расчётные соотношения для моделирования полёта квадрокоптера при воздействии ветра. Одним из параметров, ограничивающих применение квадрокоптеров, является относительно небольшое лётное время. Это связано с энергоёмкостью аккумуляторов. Небольшие размеры и вес аккумуляторной батареи приводят к их ограниченной емкости, поэтому энергоэффективность является критической проблемой для многих областей применения БПЛА. Возможные методы решения этой проблемы ориентированы на повышение ёмкости батарей, их экономное использование и построение энергетически оптимальных траекторий полёта.

Для повышения лётной выносливости квадрокоптера может быть использован автономный режим полёта, не требующий энергетических затрат на связь с оператором. Для расчёта параметров полёта, необходимых системе управления, в работе строится модель, позволяющая оценивать энергетические затраты на реализацию заданной траектории при воздействии ветра.

Выше было показано, что при построении модели квадрокоптера необходимо учитывать множество различных факторов, но проводимые исследования позволяют ограничиться достаточно простой моделью и не рассматривать его аэродинамику. Это даёт возможность описывать в

модели движение квадрокоптера с помощью линейных уравнений, что справедливо для ограниченной скорости полёта дрона – менее 10 м/с, и скорости ветра до 5 м/с. При этом основное внимание будет нацелено на оценку влияния точности показаний сенсоров на формируемую траекторию движения.

Условия и ограничения, учитываемые при построении модели:

- на борту квадрокоптера имеется контроллер, который способен поддерживать заданную скорость полёта в течение заданного времени;
- квадрокоптер не имеет связи с оператором, и весь полёт осуществляется в автономном режиме;
- квадрокоптер имеет датчик, определяющий направление полёта, например, 3-осевой гироскоп;
- в точке запуска имеется оборудование, позволяющее определять скорость и направление ветра;
- все используемые сенсоры определяют параметры с известной максимальной погрешностью;
- точность бортового таймера считается абсолютной;
- все параметры полёта передаются на борт квадрокоптера в точке запуска;
- энергетические затраты на перемещение аппарата в вертикальной плоскости не учитываются.

Постановка задачи нахождения траектории полёта, решаемой в настоящей работе, предполагает следующую последовательность действий оператора:

- определение направления и скорости ветра в точке запуска;
- расчёт навигационных параметров;
- ввод полётного задания в систему управления дрона;
- запуск дрона и выполнение миссии;
- анализ полученных результатов и, при необходимости, корректировка навигационных параметров.

Рассмотрим основные соотношения, используемые при создании модели. Введём следующие обозначения:

X_s, Y_s – координаты начальной точки траектории, точки запуска;

X_f, Y_f – координаты конечной точки траектории, целевой точки;

α_0 – расчётный угол наклона траектории полёта.

Вычисление значений скорости объекта относительно осей X и Y при отсутствии ветра может быть определено следующим образом:

$$\begin{aligned} D_x &= (X_f - X_s), \\ D_y &= (Y_f - Y_s), \\ \alpha_0 &= \arctg(D_x/D_y). \end{aligned} \quad (1)$$

Расчётные соотношения:

$$\begin{aligned} V_H &\text{ – собственная скорость полёта квадрокоптера;} \\ V_{H_x} &= V_H \cdot \cos(\alpha_0) \text{ – значение скорости объекта вдоль оси } X; \\ V_{H_y} &= V_H \cdot \sin(\alpha_0) \text{ – значение скорости объекта вдоль оси } Y. \end{aligned}$$

Расчёт траектории движения дрона в идеальных условиях не вызывает трудностей, однако не может использоваться на практике, поскольку не учитывает параметры среды, а именно скорость и направление ветра. Отметим, что мы не учитываем вертикальное движение воздушных масс и турбулентность, что вполне применимо к коротким миссиям.

Расчётные соотношения:

$$\begin{aligned} V_W &\text{ – скорость ветра;} \\ \beta &\text{ – угол ветра;} \\ V_{W_x} &= V_W \cdot \cos(\beta) \text{ – скорость ветра вдоль оси } X; \\ V_{W_y} &= V_W \cdot \sin(\beta) \text{ – скорость ветра вдоль оси } Y. \end{aligned}$$

Для расчёта параметров траектории полёта объекта при воздействии ветра введём следующие обозначения:

$$\begin{aligned} V &\text{ – скорость объекта относительно поверхности Земли;} \\ V_x &\text{ – скорость объекта относительно оси } X; \\ V_y &\text{ – скорость объекта относительно оси } Y; \\ V_y &\text{ – скорость объекта относительно оси } Y; \end{aligned}$$

Выше описана последовательность действий оператора квадрокоптера, где пункт 2 обозначен как – расчёт навигационных параметров. В данном случае необходимо определить только один параметр. Это расчётный угол направления полёта - (α). Будем рассчитывать его исходя из того, что, дрон должен достигнуть конечной точки траектории с координатами X_f, Y_f .

Проведем расчёт угла полёта. Представим движение дрона, как независимое перемещение вдоль осей X и Y . Поскольку время полёта (t) одинаково, то будет справедливо следующее соотношение:

$$\frac{(V_{H_x} + V_{W_x}) \cdot t}{V_H \cdot \cos(\alpha) + V_W \cdot \cos(\beta)} = \frac{(V_{H_y} + V_{W_y}) \cdot t}{V_H \cdot \sin(\alpha) + V_W \cdot \sin(\beta)}$$

или

$$\frac{D_x}{V_H \cdot \cos(\alpha) + V_W \cdot \cos(\beta)} = \frac{D_y}{V_H \cdot \sin(\alpha) + V_W \cdot \sin(\beta)}$$

где:

$$\begin{aligned} D_x &= |X_f - X_s| \\ D_y &= |Y_f - Y_s| \end{aligned}$$

тогда:

$$D_x \cdot V_H \cdot \sin(\alpha) - D_y \cdot V_H \cdot \cos(\alpha) = D_y \cdot V_W \cdot \cos(\beta) - D_x \cdot V_W \cdot \sin(\beta).$$

Это уравнение вида:

$$A \cdot \sin(\alpha) - B \cdot \cos(\alpha) = C.$$

Для его решения воспользуемся следующими преобразованиями.

Пусть:

$$\begin{aligned} A &= R \cdot \cos(\theta), \\ B &= R \cdot \sin(\theta). \end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} R \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\alpha) - R \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\alpha) &= C \\ \text{или } R \cdot (\cos(\theta) \cdot \sin(\alpha) - (\sin(\theta) \cdot \cos(\alpha))) &= C. \end{aligned}$$

По формуле сложения углов получим:

$$R \cdot \sin(\alpha - \theta) = C.$$

Учитывая, что:

$$A^2 + B^2 = R^2 \cos^2 \theta + R^2 \sin^2 \theta = R^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = R^2,$$

получим:

$$R = \sqrt{A^2 + B^2}.$$

Учитывая, что:

$$B/A = (R \cdot \sin(\theta)) / (R \cdot \cos(\theta)) = \operatorname{tg}(\theta),$$

получим:

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{B}{A}\right).$$

Тогда искомый угол будет равен:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{C}{R}\right) + \theta. \quad (2)$$

Используя найденный параметр, мы можем получить уравнение движения квадрокоптера:

$$\begin{cases} X(t) = X_s + (V_H \cdot \cos(\alpha) + V_W \cdot \cos(\beta)) \cdot t \\ Y(t) = Y_s + (V_H \cdot \sin(\alpha) + V_W \cdot \sin(\beta)) \cdot t \end{cases} \quad (3)$$

где:

$X(t)$ – текущее значение координаты X ;
 $Y(t)$ – текущее значение координаты Y ;
 t – время с момента старта квадрокоптера.

Эти уравнения используются в модели для реализации одной из двух стратегий полёта, исследуемых в работе. Первая стратегия основана на том, что при полёте в условиях ветровой нагрузки дрон будет следовать по кратчайшему расстоянию между начальной и конечной точками, используя скорректированное значение угла полёта.

Стратегия 1.

Пусть задана последовательность маршрутных координат в виде списка $\{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3), \dots, (X_K, Y_K)\}$.

Для каждой пары координат найдём значение угла направления полёта α , используя соотношение (2) и полагая:

$$\begin{aligned} X_s &= X_i, \\ Y_s &= Y_i, \\ X_f &= X_{i+1}, \\ Y_f &= Y_{i+1}. \end{aligned}$$

В случае замкнутой траектории для последнего участка:

$$\begin{aligned} X_s &= X_K, \\ Y_s &= Y_K, \\ X_f &= X_1, \\ Y_f &= Y_1. \end{aligned}$$

Время полёта на участке находим, как:

$$t = \frac{D_x}{V_H \cdot \cos(\alpha) + V_W \cdot \cos(\beta)}$$

или

$$t = \frac{D_y}{V_H \cdot \sin(\alpha) + V_W \cdot \sin(\beta)}$$

Перед запуском в управляющую систему дрона вводятся рассчитанные значения углов и времени полёта на каждом отрезке траектории. Отметим, что эта стратегия реализует движение дрона по кратчайшему расстоянию между всеми парами точек.

Стратегия 2.

Пусть задана последовательность маршрутных координат в виде списка $\{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3), \dots, (X_K, Y_K)\}$.

Для каждой пары координат найдём значение угла направления полёта α_0 , используя соотношение (1) и полагая:

$$\begin{aligned} X_s &= X_i, \\ Y_s &= Y_i, \\ X_f &= X_{i+1}, \\ Y_f &= Y_{i+1}. \end{aligned}$$

В случае замкнутой траектории для последнего участка:

$$\begin{aligned}X_s &= X_K, \\Y_s &= Y_K, \\X_f &= X_1, \\Y_f &= Y_1.\end{aligned}$$

Поскольку соотношение (1) не учитывает воздействие ветра, положение дрона будет отличаться от заданного. Необходимо его скорректировать. Для этого проведём расчёт корректирующего участка траектории. Рассмотрим последовательность действий на примере первого сегмента трассы. Начальные условия соответствуют маршрутным координатам:

$$\begin{aligned}X_s &= X_1, \\Y_s &= Y_1, \\X_f &= X_2, \\Y_f &= Y_2.\end{aligned}$$

В результате выполнения миссии положение дрона будет соответствовать:

$$\begin{aligned}X_f &= X'_2 \neq X_2, \\Y_f &= Y'_2 \neq Y_2.\end{aligned}$$

Определим корректирующий участок траектории:

$$\begin{aligned}X_s &= X'_2, \\Y_s &= Y'_2, \\X_f &= X_2, \\Y_f &= Y_2.\end{aligned}$$

Найдём значение угла направления полёта α , используя соотношение (2), аналогично стратегии 1. Время полёта для основных и корректирующих сегментов трассы находим, используя соотношения, представленные в стратегии 1.

Указанную последовательность расчётов проведём для всех сегментов траектории.

В уравнении движения квадрокоптера (3) присутствуют несколько параметров, которые определяются с помощью различных сенсоров. Точность их показаний, учитываемая при моделировании, представлена в таблице.

Таблица 2. Точность определения параметров модели

Параметр	Отклонение
V_H	$\pm 10\%$
V_W	$\pm 10\%$
α	$\pm 5^\circ$
β	$\pm 5^\circ$
t	0

Программная реализация модели позволяет получать весь спектр возможных траекторий движений дрона для диапазона точностей параметров, представленного в таблице 2.

Для получения реальных координат для каждого участка траектории уравнение (3) запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} X'_F = X_S + ((V_H + \Delta V_H) \cdot \cos(\alpha + \Delta\alpha) + (V_W + \Delta V_W) \cdot \cos(\beta + \Delta\beta)) \cdot t \\ Y'_F = Y_S + ((V_H + \Delta V_H) \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha) + (V_W + \Delta V_W) \cdot \sin(\beta + \Delta\beta)) \cdot t \end{cases}$$

где:

$(V_H + \Delta V_H)$ – реальное значение скорости квадрокоптера;

$(V_W + \Delta V_W)$ – реальное значение скорости ветра;

$(\alpha + \Delta\alpha)$ – реальное значение угла полёта квадрокоптера;

$(\beta + \Delta\beta)$ – реальное значение угла ветра;

X'_F и Y'_F – реальное значение координат конечной точки сегмента траектории.

Оценим вычислительную сложность процесса моделирования.

Пусть имеется N сенсоров, параметры P_i каждого из которых могут принимать следующие значения:

$$\begin{cases} P_{i_{min}} = (A_i - \Delta_i) - \text{минимальное значение;} \\ P_{i_{nom}} = A_i - \text{номинальное значение;} \\ P_{i_{max}} = (A_i + \Delta_i) - \text{максимальное значение.} \end{cases}$$

Тогда число конечных точек сегмента траектории $F(N)$ для стратегии 1 составит:

$$F(N) = 3^N.$$

Для четырёх сенсоров число возможных конечных точек для сегмента линейной траектории составит 81.

Пусть число сегментов трассы составляет M . Для треугольной трассы $M = 3$, а для четырёхугольной $M = 4$. Поскольку каждая конечная точка сегмента, становится начальной для следующего, то

число конечных точек сегмента траектории $F(N, M)$ для стратегии 2 составит:

$$F(N, M) = (3^N)^{2M}.$$

Для снижения вычислительной сложности процесса моделирования мы можем определять координаты только граничных точек траектории.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов. Программная модель позволяет оценивать условное энергопотребление квадрокоптера при различных курсах полета с учетом воздействия ветра на объект. Для верификации модели использован метод сравнения результатов симуляций с результатами аналитических расчётов.

Определим значения всех параметров модели для линейной траектории.

Таблица 2. Значения параметров модели

Параметр	Значение
V_H	5 м/с
V_W	1 м/с
β	0°
X_s, Y_s	0,0 (м)
X_f, Y_f	0,100 (м)

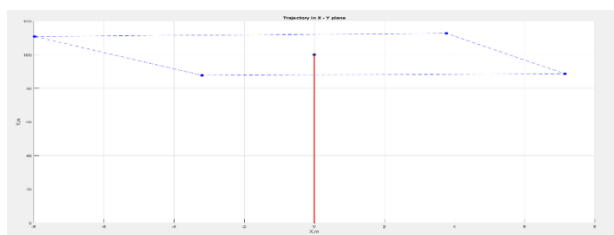


Рис. 2 Граничные конечные точки сегмента линейной траектории (стратегия 1)

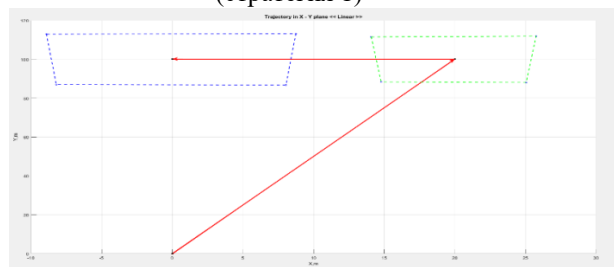


Рис. 3 Граничные точки сегментов линейной траектории (стратегия 2)

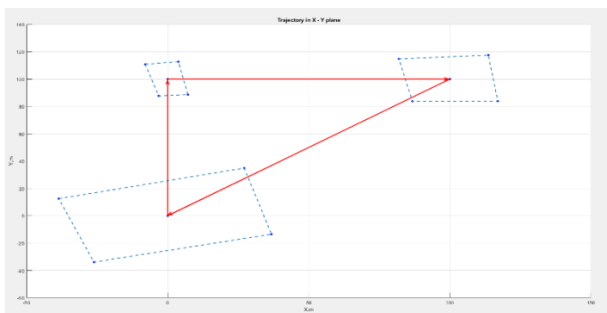


Рис. 4 Граничные точки сегментов треугольной траектории (стратегия 1)

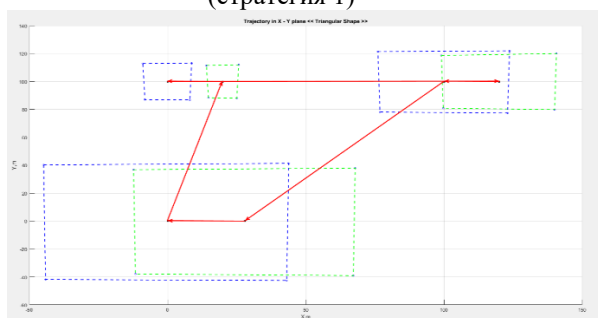


Рис. 5 Граничные точки сегментов треугольной траектории (стратегия 2)

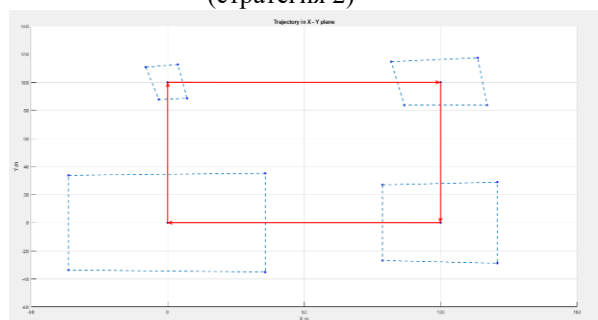


Рис. 6 Граничные точки сегментов четырёхугольной траектории (стратегия 1)



Рис. 7 Граничные точки сегментов четырёхугольной траектории (стратегия 2)

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что результаты моделирования совпадают с расчётом и верифицировать модель.

Таблица 3. Сравнение затрат энергии и ошибок позиционирования

Линейная траектория					
Стратегия	Энергия	Площадь зоны ошибки (м²)			
1	20.4124	378.18			
2	25	465.06			
Треугольная траектория					
Стратегия	Энергия	Площадь зоны ошибки (м²)			
		точка 1	точка 2	точка 3	
1	70.4124	378.18	1182.89	5185.46	
2	85.3859	465.06	2122.09	7439.56	
Прямоугольная траектория					
Стратегия	Энергия	Площадь зоны ошибки (м²)			
		точка 1	точка 2	точка 3	точка 4
1	82.4915	378.18	1182.89	2427.17	5065.15
2	100	465.06	2122.09	4688.34	8319.94

В качестве меры затрат энергии на реализацию стратегии используется время полёта. Значения, приведённые в таблице, отражают относительные величины, пропорциональные времени полёта.

Сравнительный анализ позволяет сделать вывод о том, что стратегия 1 во всех рассмотренных случаях обеспечивает меньшие затраты энергии и большую точность позиционирования, по сравнению со стратегией 2. Оценивая с практической точки зрения площади зоны ошибки, следует отметить, что полученные результаты соответствуют максимальным значениям отклонений всех датчиков, но даже при таком условии при высоте полёта порядка 50 метров дрон в состоянии обеспечить визуальное покрытие целевых точек.

что сегодня они широко используются не только в армии и в силовых структурах, но и в гражданской сфере. Следует также отметить, что развитие дронов именно для гражданских областей применения происходит наиболее динамично. Это связано с заинтересованностью компаний в расширении рынка сбыта своей продукции. Наиболее перспективным с этой точки зрения следует считать класс малых и сверхмалых летательных аппаратов, которые сегодня воспринимаются скорее как игрушки и развлечения. Актуальной задачей является увеличение функциональности легких и дешёвых БПЛА не имеющих на борту мощных сенсоров. Для её решения необходимо совершенствовать методы управления дронами в реальных условиях, в частности при воздействии ветровой нагрузки.

2. Существующая классификация БПЛА основана на разнообразии конструктивных вариантов их построения и принципов обеспечения мобильности. Анализ различных классов БПЛА показывает, что для легких аппаратов характерно использование многороторной платформы и электропривода. Относительно небольшая ёмкость аккумуляторных батарей является основным фактором, ограничивающим функциональность лёгких дронов. Использование аккумуляторов с большей ёмкостью приводит к повышению и общей массы устройства и его стоимости. Одним из возможных путей решения проблемы является использование на борту БПЛА микромеханических сенсоров, способных обеспечить его автономность без существенных затрат энергии. Это позволит более широко использовать лёгкие беспилотные летательные аппараты.

3. Задача планирования автономного полёта квадрокоптера при воздействии ветровой нагрузки аналогична задаче, которую решает штурман самолёта при прокладке его курса. Разработанная математическая модель движения квадрокоптера включает ряд уравнений, содержащих параметры, которые определяются с помощью различных сенсоров: скорость и угол полёта объекта, скорость и направление ветра. Определены уравнения движения дрона, учитывающие реальные показания всех сенсоров и рассчитывающие соответствующее им положение квадрокоптера.

Проведена оценка вычислительной сложности моделирования и предложен метод её снижения, обеспечивающий возможность использования модели в полевых условиях. Решение основано на определении только граничных точек зоны ошибки.

4. В среде Matlab разработана модель автономного полёта квадрокоптера при воздействии ветровой нагрузки, направленная на оценку реализуемой траектории движения с точки зрения затрат энергии и точности позиционирования. Она позволяет сравнивать различные стратегии и выбирать ту, которая обеспечит выполнение полётного задания.

В процессе верификации модели подтверждено, что получаемые результаты полностью соответствуют аналитическому расчёту.

5. В ходе исследований функциональности модели для трёх вариантов маршрутов полёта проведены симуляции, результаты которых подтвердили возможность её использования для оценки точности позиционирования автономных квадрокоптеров при полёте в условиях ветровой нагрузки. Получены количественные оценки – затраты энергии и площадь зоны ошибки, достаточные для проведения сравнительного анализа различных стратегий планирования полёта. Выбранные параметры значимо изменяются в зависимости от стратегии полёта.

Разработано не требующее значительных вычислительных ресурсов приложение, позволяющее рассчитать и передать на борт контроллеру параметры автономного полёта дрона в условиях ветровой нагрузки.

Публикации, в которых представлены основные результаты работы

Статьи в журналах из списка ВАК РФ:

1. **Aung Thu**, Andrei Turkin. Benchmarking Python Tools for Automatic Differentiation // International Journal of Open Information Technologies, №. 9, Т. 4, 2016, с. 87-89.
2. Хтун Хтун Линн, С. А. Лупин, Чжо Най Зо Линн, **Аунг Тху**, Вей Ян Мин. Натурное и имитационное моделирование централизованной системы управления транспортными роботами // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 8, no. 4, 2020, pp. 17-24.
3. Минь Тху Кхаинг, С. А. Лупин, **Аунг Тхут**. Оценка эффективности методов балансировки нагрузки в распределенных вычислительных системах // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 9, no. 11, 2021, pp.30-36.

Статьи, индексированные в Scopus:

4. Wai Yan Min, Ekaterina Romanova, Yuri Lisovec, Htet Soe Paing, **Aung Thu**. Using statistical data processing in the identification of individuals by principal component analysis method // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic

Engineering (EIconRus) (January 27-30, 2020, Moscow, Russia), pp. 2023-2027. (IEEE)

5. Aung Myo San, Alexey N. Yakunin, Han Myo Htun, **Aung Thu**. Development and result verification of a multi-bit binary parallel-prefix adder-subtractor // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus) (January 27-30, 2020, Moscow, Russia), pp. 1773-1779. (IEEE)

6. **Aung Thu**, Sergey Lupin, Tun Min Oo, Alexander Gureev, Min Thu Khaing. Comparing a Quadrotor Energy Consumption for Different Flight Trajectories in Windy Conditions // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus) (January 26-29, 2021, Moscow, Russia), pp. 2064-2066. (IEEE)

7. Tun Min Oo, Sergey Lupin, **Aung Thu**, Min Thu Khaing. Using Hybrid Modeling for Estimation of the Efficiency of Service Systems // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus) (January 26-29, 2021, Moscow, Russia), pp. 2277-2280. (IEEE)

Статьи и тезисы докладов:

8. М. В. Нестюркина, Д. А. Федяшин, **Аунг Тху**. Метод статистического анализа при обработке Big Data // Микроэлектроника и информатика - 2018. 25 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция: Тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2018г, С.138.

9. **Аунг Тху**, Хей Ты Ха Лвин, Мин Тху Кхаинг. Моделирование движения квадрокоптера с использованием среды Matlab // Актуальные проблемы информатизации в науке и образовании – 2018. 11 Всероссийская научно-практическая конференция: Тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2018г. С. 4.

10. Мин Тху Кхаинг, **Аунг Тху**. Исследование методов резервирования узлов в распределенных вычислительных системах // Актуальные проблемы информатизации в науке и образовании – 2018. 11 Всероссийская научно-практическая конференция: Тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2018г., С 36.

11. Мин Тху Кхаинг, **Аунг Тху**. Повышение эффективности вычислений в грид-системах // Микроэлектроника и информатика - 2019. 26 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция: Тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2019 г., С. 132.

12. **Аунг Тху**, Мин Тху Кхаинг, Тун Мин У. Построение энергетически оптимальной траектории движения квадрокоптера при воздействии ветра // Микроэлектроника и информатика - 2020. 27 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция: Тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2020г.С 141.

13. Мин Тху Кхаинг, Тун Мин У, **Аунг Тху**. ГИС-модель для анализа эффективности работы общественного транспорта //

Микроэлектроника и информатика - 2020. 27 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция: Тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2020г. С 154.

14. Тун Мин У, **Аунг Тху**, Мин Тху Кхаинг. Исследование централизованного алгоритма управления транспортными роботами // Инновационные технологии современной научной деятельности: стратегия, задачи, внедрение. Международная научно-практическая конференция: сборник статей, Пенза, OMEGA SCIENCE, 2020. – с. 89-91.

15. Тун Мин У, **Аунг Тху**, Мин Тху Кхаинг. Планирование системы общественного транспорта в среде моделирования AnyLogic // LXXIV Международные научные чтения (памяти А. Л. Чижевского). Международная научно-практическая конференция: сборник статей, – Москва: ЕФИР, 2020. – с. 39-41.

16. Тун Мин У, Вин Мин У, Мин Тху Кхаинг, С. А. Лупин, **Аунг Тху**. Гибридная модель для оценки эффективности транспортных систем // Микроэлектроника и информатика - 2021. 28 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция: Тезисы докладов. - М.: МИЭТ, с.140.

17. Мин Тху Кхаинг, С. А. Лупин, **Аунг Тху**. Исследование методов балансировки нагрузки узлов в распределенных вычислительных системах // Микроэлектроника и информатика - 2021. 28 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция: Тезисы докладов. - М.: МИЭТ, с.133.

18. Мин Тху Кхаинг, **Аунг Тху**. Статическая балансировка нагрузки узлов в распределенных вычислительных системах при решении оптимизационных задач // Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях - 2021. Международная научно-практическая конференция: Тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2021г., С..

19. **Аунг Тху**, Д.А Федяшин. Сравнительный анализ стратегий управления полётами дронов // Микроэлектроника и информатика - 2022. 29-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2022г., С..

Примечание. Ссылки на используемые в работе источники и их список приведены в тексте диссертации.

Подписано в печать:

Заказ № . Тираж 70 экз. Уч.-изд. л. 1,2. Формат 60х84 1/16.

Отпечатано в типографии ИПК МИЭТ.

124498, г. Москва, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ